

### III. Заключение

Таким образом, теоретическое исследование подтверждает возможность искажения огибающей спектра импульса на выходе усилительного клистрона из-за неточной настройки резонаторной системы на частоту входного сигнала, неравномерности коэффициента усиления клистрона и возбуждения в выходном резонаторе близко расположенных по частоте типов колебаний.

#### Литература

1. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. М., "Советское радио", 1970.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-ое, перераб. и доп. / Под ред. Ширмана. - М.: Радиотехника, 2007.
3. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т.П. М., "Высшая школа", 1972.
4. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.1. - М.:ФИЗМАТЛИТ, 2003.
5. <http://www.cst.com>

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЖИМА СИНХРОНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С ВЫСШЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГАРМОНИКОЙ П ВИДА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ФРОНТА МОДУЛИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА КООКСИАЛЬНОГО МАГНЕТРОНА

асп. Омиров А.А., проф. Нефедов В.Н.

Московский институт электроники и математики (МИЭМ (ТУ))

*The problem of coaxial magnetron generation on duration bigger than classical magnetron of a modulating impulse front is considered. Various ways of this problem decision are analyzed. The expediency of their application is considered. It's in detail analyzed a regime of interaction with the higher spatial harmonics of  $\pi$  mode. Advantages of this regime are described, its lacks and ways of their elimination are considered. Conclusions on expediency of such mode application in coaxial magnetron for the purpose of a modulating impulse front duration reduction demanded for stable generation are drawn.*

В радиолокации магнетроны получили широкое распространение благодаря высокому КПД, простоте источника питания, массогабаритным параметрам, а также сравнительно невысокой стоимости. Наиболее широко применяемые модификации - классический магнетрон (равнорезонаторный со связками и разнорезонаторный) и коаксиальный магнетрон (КМ).

КМ обладает значительно лучшими показателями стабильности благодаря наличию стабилизирующего резонатора (СР) и возможности селективного подавления поглотителями мешающих видов колебаний. Наиболее уязвимым его параметром по сравнению с классическими магнетронами, ограничивающим области применения, является увеличение длительности фронта модулирующего импульса. Это приводит к уменьшению разрешающей способности радиолокатора по дальности. По этой причине улучшение стабильности работы КМ при малой длительности фронта модулирующего импульса является одной из основных задач разработчиков магнетронов.

Проведенный анализ показал, что длительность фронта модулирующего импульса без потери стабильности работы возможно уменьшать с ростом характеристического сопротивления [1]. Там же приведена формула (1), из которой следует, что характеристическое сопротивление уменьшается с уменьшением угла раскрытия резонатора:

$$Y = j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{h}{\psi a} \frac{J_0(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_0(ka)}{J_1(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_1(ka)}, \text{ где} \quad (1)$$

$\varepsilon_0, \mu_0$  - диэлектрическая и магнитная проницаемость в вакууме соответственно;  $h$  - высота резонатора;

$$a = \frac{r_a \cdot \sin(\theta)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} - \text{эффективный радиус анода}; \quad b = a + r_b - r_a - \text{эффективный радиус по}$$

стенкам резонатора;  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число свободного пространства;  $j$  - мнимая единица;

$J_0, J_1, N_0, N_1$  - функции Бесселя и Неймана нулевого и первого порядков соответственно;

$\psi = \frac{2\pi}{N}$  - угол раскрытия лопаточного резонатора (при ламелях постоянной толщины);

$N$  - количество резонаторов.

В современных КМ применяются резонаторные системы с большим количеством резонаторов - до 44 и более - что ведет к значительному уменьшению угла раскрытия и, как следствие, уменьшению характери-

ческого сопротивления, что приводит к требованию увеличения длительности фронта модулирующего импульса.

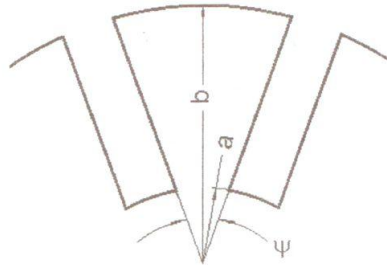


Рис. 1. Обозначение геометрических параметров резонатора с ламелями постоянной толщины

В [2] изложена так называемая теория "помогающих видов", согласно которой длительность фронта модулирующего импульса, требуемая для стабильной работы КМ, должна уменьшаться с увеличением количества резонаторов. В [3] доказана несостоятельность данной теории. Поэтому в дальнейшем исследовании мы будем руководствоваться [1].

Увеличение угла раскрыва резонаторов возможно различными способами. Наиболее простым является уменьшение количества резонаторов. Однако это приводит к уменьшению радиальных размеров пространства взаимодействия и, как следствие, к уменьшению долговечности.

Другим известным способом увеличения угла раскрыва резонаторов является изготовление ламелей переменной толщины, но из-за малой толщины ламелей в АЗС КМ этот метод не применяется. Это связано с тем, что уменьшение толщины ламелей  $\tau_b$  ведет к уменьшению тепловой и механической прочности АЗС, а увеличение  $\tau_a$  ограничено наличием экстремума по диссипативным потерям в стенках резонаторов в соотношении  $\tau_a/w$  ( $w$  – ширина входной щели резонатора на границе с пространством взаимодействия).

Переход на режим взаимодействия электронного потока с низшей пространственной гармоникой  $\pi$  вида колебаний позволяет уменьшить количество резонаторов при сохранении коэффициента замедления волны ВЧ потенциала  $\gamma$ . Как следствие, использование этого режима также позволяет увеличить угол раскрыва. В [4] описаны два опытных макета коаксиальных магнетронов с 16-ти резонаторной АЗС, работающей в режиме взаимодействия электронного потока с низшей пространственной гармоникой  $N/4$  вида колебаний. Первый образец не перестраивался по частоте и обеспечивал мощность до 40 кВт при КПД 8%. Во втором образце перестройка частоты осуществлялась в полосе 600 МГц (1,3%) при двукратном перепаде мощности. Полученные результаты значительно уступают характеристикам классических типов магнетронов, генерирующих колебания с аналогичной длиной волны. Оценка возможности совершенствования полученных результатов проведена не была. Можно сделать вывод об отсутствии целесообразности применения в коаксиальных магнетронах режима взаимодействия с низшими пространственными гармониками.

Возможен также вариант использования режима взаимодействия электронного потока с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида колебаний. Анализ литературы показывает, что первые попытки применения этого режима взаимодействия были предприняты более 50 лет назад. Идея использования режима взаимодействия с высшими пространственными гармониками принадлежит Г. Я. Левину [5]. Однако полученный в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн КПД 0,3 – 1% не позволяет дать оптимистической оценки результатов эксперимента. Судя по всему, причиной таких результатов является использование автором [5] режима взаимодействия с высшими пространственными гармониками вырожденного вида колебаний и разнорезонаторной замедляющей системы. Еще одним недостатком являлся неправильный выбор соотношения  $\tau/w$ , что, как показывают расчеты по полемому методу [1], приводит к резкому увеличению диссипативных потерь.

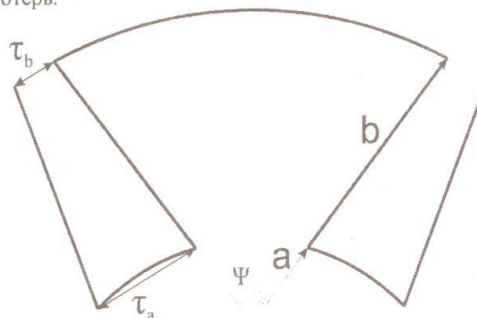


Рис. 2 Резонаторная система магнетрона с ламелями переменной толщины.



За рубежом также проявляли интерес к режиму взаимодействия электронного потока с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида колебаний. Авторы [6] использовали этот метод с целью устранения проблем, возникающих при работе на вырожденном виде колебаний. Однако разработанная ими равнорезонаторная система магнетрона, генерирующего в 3х сантиметровом диапазоне длин волн не позволили судить о перспективности ее применения в миллиметровом диапазоне. Как и автор [5], зарубежные разработчики неверно выбрали соотношение  $t/w$ , что в сочетании неоднородным пространством взаимодействия привели к малой выходной мощности.

Из-за неудовлетворительных результатов, показанных в этих публикациях, долгое время этот режим взаимодействия не рассматривался разработчиками магнетронов. В начале 2000-х годов появились публикации [7, 8], показывающие возможность существенного улучшения параметров магнетронов, включая коаксиальные, использующих режим взаимодействия с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида колебаний.

Применение в магнетроне режима взаимодействия с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида колебаний позволяет значительно увеличить угол раскрыва резонаторов АЗС по сравнению с классическими АЗС КМ. Это связано с тем, что оптимальное соотношение  $t/w$  при использовании такого режима примерно равно 3 против 1 в классических АЗС [8]. В сочетании с уменьшением количества резонаторов втрое при сохранении  $\gamma$  благодаря этому появляется возможность применения ламелей переменной толщины (рис. 2), сохраняя достаточную тепловую и механическую прочности. Проведен ряд расчетов АЗС КМ, работающих в режиме взаимодействия с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида. Благодаря вышеперечисленным мерам уровень собственных диссипативных потерь систем с использованием режима взаимодействия с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида приближается к уровню потерь системы, работающей на основной волне  $\pi$  вида. В некоторых случаях наблюдается даже уменьшение диссипативных потерь по сравнению с исходными системами. В качестве прототипов использованы реально существующие опытные макеты магнетронов. Результаты расчета сведены в таблицу 1.

**Таблица 1.** Сравнение параметров АЗС КМ, работающих на основной волне  $\pi$  вида колебаний и применяемых в опытных макетах магнетронов (прот. 1 – прот. 3), и АЗС, использующих режим взаимодействия с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида колебаний (вар. 1 – вар. 3)

Тип системы	$f_{расч}$ , МГц	$d_k$ , мм	$d_a$ , мм	$\tau_a$ , мм	$\psi$ , град	N	$\gamma$	$U_a$ , кВ	$U_a/U_c$	В, Тл	Потери, усл. ед.*	Отн. потери
Опытный образец низковольтного магнетрона 2см диапазона длин волн												
Прот. 1	15184	4,13	5,00	0,23	10,6	34	17	4	7,149	0,817	5381	1,000
Вар. 1	15184	4,13	5,00	1,06	49,5	12	18	4	8,014	0,854	5429	1,009
Вар. 2	15184	4,13	5,00	1,27	61,7	10	15	4	5,566	0,746	5539	1,029
Опытный образец высоковольтного магнетрона 8мм диапазона длин волн												
Прот. 2	37334	4,76	5,80	0,22	9,0	40	20	15	4,561	1,134	9999	1,000
Вар. 1	37334	4,76	5,80	1,04	76,8	14	21	15	5,029	1,171	13060	1,306
Вар. 2	37334	4,76	5,80	1,20	81,8	12	18	15	3,694	1,064	14782	1,478
Вар. 3	37334	4,76	6,00	0,95	65,2	16	24	15	6,137	1,068	12790	1,279
Опытный образец низковольтного магнетрона 8мм диапазона длин волн												
Прот. 3	30910	3,15	3,80	0,13	8,2	44	22	5	6,252	1,162	6913	1,000
Вар. 1	30910	3,15	3,80	0,70	53,4	14	21	5	5,697	1,124	6439	0,931
Вар. 2	30910	3,15	4,00	0,64	46,3	16	24	5	6,715	0,933	6789	0,982
Вар. 3	30910	3,40	4,10	0,66	47,6	16	24	5	6,392	1,087	7079	1,024

Примечание: \* - условные единицы связаны с тем, что в расчете потерь не учитываются физические свойства материала системы.

Сравнение режимов взаимодействия с основной волной  $\pi$  вида и с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида показывает увеличение угла раскрыва резонаторов АЗС во втором случае от 4,5 до 11 раз. Можно сделать вывод о значительном увеличении характеристического сопротивления. При этом в низковольтных магнетронах диссипативные потери остались на уровне прототипов, а в высоковольтном - возросли, но незначительно. Таким образом, применение систем на высших пространственных гармониках  $\pi$  вида колебаний в качестве АЗС КМ позволяет снизить требуемую длительность фронта модулирующего импульса КМ до уровня классических магнетронов и ниже.

При расчете анодных замедляющих систем с использованием режима взаимодействия с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида выявлен ряд важных закономерностей. Одной из наиболее важных оказался экстремальный характер зависимости диссипативных потерь от угла раскрыва. Проведенный мас-

сив расчетов показал, что при использовании полностью медной АЗС экстремум лежит в области  $\psi = 82^\circ$ , однако зависимость является достаточно пологой. Судя по всему, это является следствием изменения соотношения потерь в боковых и периферийной стенках резонатора. Отсутствие описания этого факта в литературе связано с тем, что в системах с иным типом взаимодействия электронного потока невозможно получить столь большой угол раскрыва. При этом отношение толщины торца ламели к ширине входной щели резонатора на границе пространства взаимодействия должно находиться примерно на уровне  $\tau_a/w = 3$ . Выполнении двух этих требований позволяет значительно снизить диссипативные потери в стенках резонаторов.

Установлена закономерность, что при достаточно большом угле раскрыва ( $82 > \psi > 50$ ) увеличение количества резонаторов и сохранение радиуса анода влечет за собой рост не только предельный электронного, но и контурного КПД. Выполнить такое увеличение возможно либо за счет увеличения индукции магнитного поля в пространстве взаимодействия (в случае, если требуемые габариты прибора позволяют это сделать), либо за счет уменьшения диаметра катода (в случае низковольтных маломощных магнетронов, где незначительное уменьшение диаметра катода практически не повлияет на долговечность). Таким образом, первоначально при разработке приборов с использованием взаимодействия электронного потока с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида наиболее целесообразным является поиск предельного электронного КПД.

Известно, что температура ламелей складывается из средней температуры и импульсной надбавки [9, 10]. При постоянной подводимой мощности на величину импульсной надбавки влияет площадь торцов ламелей, а на среднюю температуру - средняя толщина ламелей. Применение предложенного режима взаимодействия позволяет увеличить суммарную площадь торцов ламелей в 1,5 - 2 раза, а суммарную среднюю толщину сохранить. Это приводит к уменьшению суммарной температуры ламелей АЗС в генераторном режиме по сравнению с прототипом.

Использование режима взаимодействия электронного потока с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида в КМ значительно увеличивает характеристическое сопротивление, что открывает возможность уменьшения требуемой для стабильной работы длительности фронта модулирующего импульса. Расчет показал, что при выборе оптимальных параметров  $\tau_a$ ,  $\tau_b$ ,  $V$ ,  $N$  и  $\gamma_k$  возможно получение большего как контурного, так предельного электронного КПД по сравнению с системой прототипа, работающей на основной волне  $\pi$  вида. В некоторых случаях при сохранении уровня потерь возможно увеличить радиальные размеры пространства взаимодействия, что в сочетании с уменьшением тепловой нагрузки на ламели АЗС повышает долговечность прибора. Все перечисленные факторы позволяют рекомендовать применение замедляющих систем на высшей пространственной гармонике  $\pi$  вида колебаний в качестве АЗС КМ.

#### Литература

1. «Магнетроны сантиметрового диапазона», т.1. Перевод под редакцией С.А. Зусмановского. «Советское радио», Москва, 1950г.
2. Шлифер Э.Д. «Расчет и проектирование коаксиальных и обращено-коаксиальных магнетронов», М.: МЭИ, 1991г.
3. Омиров А.А. «О продвижении коаксиального магнетрона в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн и теории «помогающих видов», «Труды XII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», МГУ, Москва, 2011, с. 178-182.
4. Еремка В.Д., Кулагин О.П., Науменко В.Д. и др. «Разработка и исследование магнетронов в институте радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова и радиоастрономическом институте НАН Украины», «Радиофизика и электроника», т.9, спец. вып. 2004.
5. Левин Г.Я. «Высшие пространственные гармоники в магнетронах с симметричным анодным блоком», «Труды радиофизических отделов ФТИ АН УССР», т.2, 1954г., с. 124-133.
6. Робертшу, Уилшоу. «Некоторые свойства маломощных магнетронов, работающих на высших пространственных гармониках». Сборник «Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями» под редакцией Федорова М.М., т. 2, М.: «Иностранная литература», 1961г.
7. Гурко А.А «Коаксиальный магнетрон на высших пространственных гармониках  $\pi$ -вида». «Электромагнитные волны и электронные системы», №10. 2003г., с.49-51.
8. Гурко А.А, «Магнетрон на высших пространственных гармониках  $\pi$ -вида колебаний». «Радиофизика и радиоастрономия», т.5, №1, 2000г., с.80-83.
9. Шлифер Э.Д. «Расчет многорезонаторных магнетронов», М.: МЭИ, 1966г.
10. Самсонов Д.Е. «Основы расчета и конструирования многорезонаторных магнетронов», «Советское Радио», Москва, 1966г.



## ТРУДЫ

Российского научно-технического общества  
радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова

Серия: Научная сессия, посвященная Дню радио  
Выпуск: XLVII

107031, Москва, К-31, ул. Рождественка, д.:6/9/20 стр.1

Исполнительная Дирекция РНТОРЭС им. А.С. Попова

Телефоны:	E-mail:
(495) 621-71-08 организация	<a href="mailto:rntores@mail.ru">rntores@mail.ru</a>
(495) 621-16-39 доклады	<a href="mailto:doklad-rntores@mail.ru">doklad-rntores@mail.ru</a>
Тел/Факс: (495) 621-06-10 финансы	<a href="mailto:vznos-rntores@mail.ru">vznos-rntores@mail.ru</a>
Сайт: <a href="http://www.rntores.ru/">http://www.rntores.ru/</a>	

Отпечатано по заказу ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, РНТОРЭС им. А.С. Попова  
в типографии ООО «Информпресс-94»  
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8  
Тираж 200 экз., заказ № 0187

**67-th RDC-2012 - radio day conference  
with the international participation**

**The scientific session devoted  
to Day of radio (release of LXVII)**



**RDC-2012**

ISBN 978-5-905278-02-0



9 785905 278020

**Moscow - 2012**